



УДК 621.039

**РЕАКТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ  
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ  
ПЕРЕМЕННОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА****REACTOR TESTS OF DESIGNS OF  
CONSTRUCTION MATERIALS OF VARIABLE  
CHEMICAL COMPOSITION**

**Лукьяненко Вера Юрьевна**, студент каф. «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: vera-lukyanenko@mail.ru. Тел.: +7(343)375-97-37

**Шабельников Евгений Вадимович**, начальник группы эксплуатации экспериментальных стендов отдела эксплуатации исследовательской ядерной установки, АО «Институт реакторных материалов», Россия, Свердловская обл., г. Заречный, а/я 29. E-mail: evgenij.shabelnikov@gmail.com. Тел.: +7(343)773-50-76

**Ташлыков Олег Леонидович**, кан.-т. техн. наук, доцент каф. «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: otashlykov@list.ru. Тел.: +7(343)375-97-37

**Vera U. Lukyanenko**, Student, Department «Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: vera-lukyanenko@mail.ru. Ph.: +7(343)375-97-37

**Evgenij V. Shabelnikov**, Head of the Experimental Stand Operation Unit of the Operation Department of the Research Nuclear Plant, JSC «INM», Zarechny, Sverdlovsk region, Russia, P.O. Box # 29. E-mail: evgenij.shabelnikov@gmail.com. Тел.: +7(343)773-50-76

**Oleg L. Tashlykov**, Cand. Sci., Associate professor, Department «Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: otashlykov@list.ru. Ph.: +7(343)375-97-37

**Аннотация:** Приведено обоснование проведения исследований, основные этапы и ожидаемые результаты. Приведено описание экспериментального устройства, обеспечивающего требуемые условия облучения, а также дополнительные условия, например, возможность разборки облучательного устройства и извлечения облученных образцов в условиях защитных камер для последующих испытаний и исследований. Приведены результаты тепловых расчетов с учетом теплопроводности среды в зазорах для требуемых температур облучения образцов. Обоснована безопасность эксплуатации экспериментального устройства.

**Abstract:** The study substantiation, main stages and expected results are presented. The description of the experimental device providing the required irradiation conditions is described as well as additional conditions, for example, the possibility of disassembling the irradiation device and extracting the irradiated samples under protective chamber conditions for subsequent testing and research. The results of thermal calculations are presented with allowance for the thermal conductivity of the medium in the gaps for the required irradiation temperatures of the samples. The safety of operation of the experimental device is justified.

**Ключевые слова:** экспериментальное устройство, объект исследования, облучение образцов, прецизионная программа, тепловые расчеты, послереакторные исследования, механические свойства, переменных химический состав, конструкционные материалы.

**Key words:** Experimental device, object of investigation, sample irradiation, precision program, thermal calculations, post-reactor studies, mechanical properties, variable chemical composition, structural materials.

**ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

В направлении повышения безопасности работы оборудования атомных энергетических установок

актуальными являются результаты определения механических свойств облученных перспективных образцов переменного химического состава.

В рамках решения данного вопроса была поставлена задача провести реакторные испытания конструкционных кандидатных образцов при температурах 100, 200, 300 °С до флюенса  $2,8E+21$  нейтр./см<sup>2</sup> ( $E > 0,1$  МэВ). Для этого на этапе подготовки экспериментального устройства (ЭУ) для облучения в исследовательском реакторе ИВВ-2М необходимо было руководствоваться следующими принципами:

- простота (изготовления, загрузки, контроля и последующего демонтажа);
- возможность облучения большого числа образцов при 3-х базовых температурах;
- возможность получить данные о температуре и нейтронном потоке при облучении.

Работы подобного типа проводились и ранее в различных исследовательских реакторах с широким разнообразием физических и ядерных характеристик, что обуславливало многотипность

ЭУ. Кроме того, вариативность ЭУ (размеры и форма ампул, капсул) зависит от постановки конкретных задач. Поэтому, в полной мере воспользоваться предшествующим опытом не представлялось возможным.

Ввиду вышесказанного была реализована собственная разработка ЭУ-300, предназначенного для проведения реакторного облучения экспериментальных образцов перлитной стали 15Х2НМФА, кл.1 и аустенитной стали Нп-08Х25Н13ГУ. Для изготовления деталей экспериментального устройства используется нержавеющая сталь марки 12Х18Н10Т (ГОСТ 5632-72) и алюминиевые сплавы типа САВ, разрешённые для применения в атомной энергетике [1]. Основные технические характеристики экспериментального устройства приведены в таблице 1. Общий вид экспериментального устройства представлен на рис. 1.

Таблица 1.

Технические характеристики ЭУ-300

Наименование систем и оборудования и их характеристики	Единица измерения	Значение параметра, материал, рабочая среда	Примечание
рабочее давление в полости ЭУ	МПа (кгс/см <sup>2</sup> )	0,1 (1,0)	
расчетная температура корпуса ЭУ, не более	°С	86	
расход охлаждающей реакторной воды, не более	м <sup>3</sup> /ч	4,76	
габаритные размеры: - длина - диаметр в а.з., в БЛ, тах	мм мм	7820 60	
«физический» вес ЭУ, не более		- 0,5% dk/k	
масса ЭУ	кг		определяется при изготовлении
масса ОУ в АЗ	кг	3,64	по расчету
плотность потока быстрых нейтронов ( $E > 0,1$ МэВ)	нейтр./см <sup>2</sup> ×с	$(0,8-1,5) \times 10^{14}$	оценка для боковой ловушки
среда в полостях ЭУ		гелий, азот, вакуум азотно-гелиевая смесь	по требованию Заказчика
значения регулируемых температур	°С	100, 200, 300	
погрешность измерения температуры	°С	$\pm 7$	
флюенс нейтронов для $E > 0,1$ МэВ, тах	нейтр./см <sup>2</sup>	$(1,5-2,7) \times 10^{21}$	
длительность испытаний, тах	эфф. час	5000	оценка для боковой ловушки

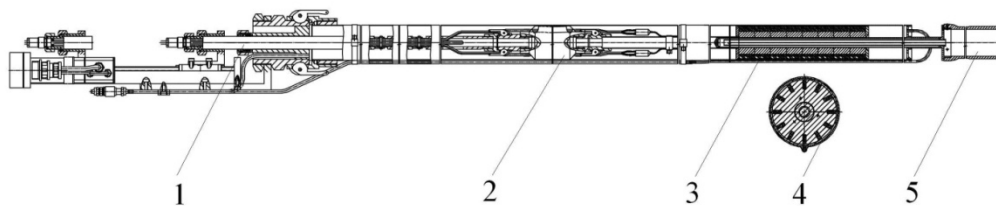


Рис. 1. Общий вид облучательного устройства ЭУ-300: 1 – патрубки стыковки входных и выходных трубопроводов ЭУ с коммуникациями газовакуумной части стенда «Урал», выход соединений КИП; 2 – регулирующий механизм; 3 – рабочий участок экспериментального устройства с навеской, содержащей облучательные образцы; 4 – сечение ЭУ в районе навески; 5 – хвостовик ЭУ для фиксации в решетке АЗ ИЯР ИВВ-2М

### ОПИСАНИЕ КАРКАСНОГО БЛОКА

Стальные образцы закрепляются в каркасном блоке из алюминия с тем, чтобы по возможности обеспечить наилучший контакт между массивом блока и образцами. Такое расположение образцов улучшает теплопередачу, тем самым обеспечивая базовые температуры во время облучения. В подтверждение данного тезиса на рис. 3,4 приведены результаты расчетов температурных полей в радиальных сечениях блока, выявленные с использованием расчетной программы “ANSYS”.

Между каркасным блоком и оболочкой ампулы организован гелий-неоновый теплорегулирующий зазор, допускающий изменение целевой теплопередачи. Регулирование теплопередачи образцов осуществляется посредством замены газовой среды в теплорегулирующем зазоре, либо организации газовой смеси. Измерение и регулирование температуры основывается на применении большого числа хромель-алюмелевых термопар, установленных в различных местах ампулы. На рис. 2 показан фрагмент каркасного блока ЭУ с обозначением основных деталей.

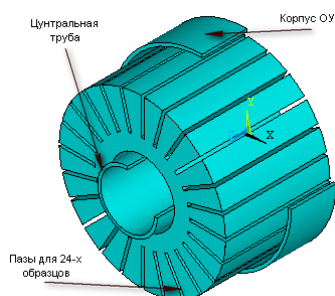


Рис. 2. Фрагмент общего вида каркасного блока

Определение влияния облучения на образцы определяется через измерение характеристик нейтронного поля, особенно величины потока и дозы нейтронов высших энергий ( $E \geq 1$  МэВ). Предполагается использовать термонейтронные датчики, устанавливаемые с внешней стороны ампулы, а также методику одновременного облучения образцов сталей и активационных детекторов. Детекторы размещаются в надрезах облучаемых образцов, предназначенных для

испытаний на копре Шарпи. Детекторами диаметром 0,5 мм для нейтронов высших энергий могут быть проволоки из железа ( $Fe^{54}(n,p)Mn^{54}$ ), никеля ( $Ni^{58}(n,p)Co^{58}$ ) и титана ( $Ti^{46}(n,p)Sc^{46}$ ), а для тепловых – кобальт (в виде незначительных примесей в алюминиевой проволоке). По окончании облучения активированная проволока подвергается анализу на содержание указанных выше продуктов активации, и на основании этих данных, с учетом среднего поперечного сечения поглощения для всего спектра, и на основе предположения о незначительном замедлении спектра вычисляется величина потока нейтронов с энергией более 1 МэВ.

На рисунке 3 показано температурное поле сечения сборки, расположенного выше геометрического центра активной зоны на 70 мм (место размещения образцов с заданной температурой 100 °С).

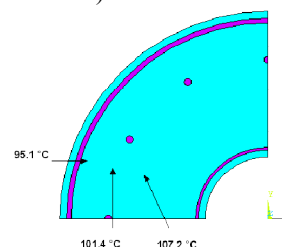


Рис. 3. Температура для образцов 100 °С

На рисунке 4 показано температурное поле сечения сборки, расположенного ниже геометрического центра активной зоны на 25 мм (место размещения образцов с заданной температурой 200 °С в зоне максимального нейтронного потока).

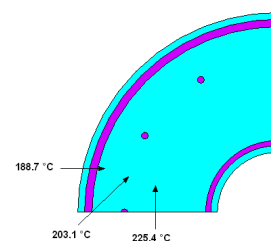


Рис. 4. Температура для образцов 200 °С.

Местом предполагаемого расположения экспериментального устройства в активной зоне реактора ИВВ-2М [2] является боковая ловушка (БЛ), водяная полость, окруженная тепловыделяющими сборками (ТВС). При различной компоновке активной зоны боковая ловушка может быть окружена пятью или шестью ТВС (рис. 5).

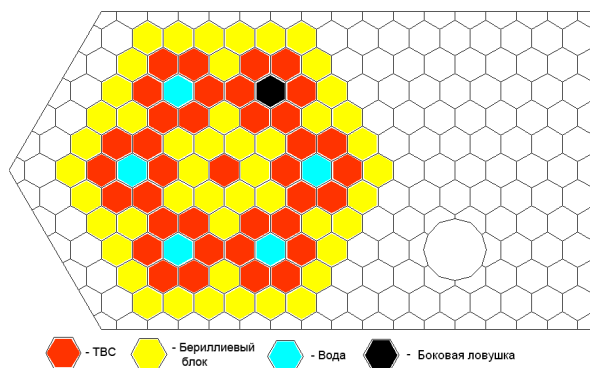


Рис. 5. Картограмма активной зоны реактора из 37 ТВС с возможным размещением боковой ловушки

Экспериментальное устройство ЭУ-300 размещается в баке реактора, в боковой ловушке активной зоны реактора ИВВ-2М. Создание требуемой среды в экспериментальном устройстве обеспечивается с помощью газовакуумной системы экспериментального стенда «УРАЛ», «РИСК». Измерение температуры и управление механизмом перемещения осуществляется с использованием автоматизированной системы контроля и управления (АСКУ) стендов «УРАЛ», «РИСК». Загрузка ЭУ в реактор осуществляется в соответствии с рабочей инструкцией.

Перед началом испытаний после загрузки экспериментального устройства в реактор проводится заполнение внутренних полостей ЭУ гелием с использованием ГВС в составе стенда «УРАЛ». При наличии в облучательном устройстве гелия на элементах навески фиксируется минимально-возможная температура. После выхода реактора на номинальную мощность для выхода на температурный режим, в случае необходимости повышения температуры, проводится регулировка давления гелия (в полостях экспериментального устройства создается разрежение с помощью газо-вакуумной системы в составе стенда «УРАЛ»). Регулировка давления также может производиться в процессе работы реактора на номинальной мощности. С помощью механизма перемещения может проводиться дополнительная регулировка температуры облучаемых образцов.

Конструкция блока и его размещение в корпусе ЭУ обеспечивают требуемые условия облучения (температуры, нейтронные и гамма-поток, состав

газовой среды и возможность ее обмена или замены), а также (в случае необходимости) дополнительные условия, например, возможность разборки облучательного устройства и извлечения облученных образцов в условиях защитных камер для последующих испытаний и исследований.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предварительный анализ дает основание для следующих выводов:

- экспериментальное устройство ЭУ-300 обеспечивает, при использовании стенда «УРАЛ», требования к условиям облучения образцов при температурах 100 – 300<sup>0</sup>С.
- нейтронно-физические и тепло-гидравлические расчёты показывают возможность достижения в ЭУ требуемых тепловых нагрузок.
- поступление радионуклидов во внешнюю среду в нормальных условиях эксплуатации, а также аварийных ситуациях не превышает контрольных уровней.
- анализ возможных аварийных ситуаций показывает безопасность эксплуатации ЭУ.
- ЭУ-300 отвечает требованиям стандарта предприятия, предъявляемым к ЭУ.
- ЭУ-300 соответствует 4 классу безопасности по НП-033-11.

После облучения предполагаются испытания образцов на ударную вязкость путем последовательной реализации:

- операции механической обработки образцов;
- операции при испытаниях на ударную вязкость методом падающего груза, копер Шарпи с использованием не менее 6 образцов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Персов Б. З. Расчет и проектирование экспериментальных установок. - Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика»; Институт компьютерных исследований, 2006. - 348 с.
2. Русских И.М., Ташлыков О.Л. Получение радиоактивных изотопов в исследовательском ядерном реакторе для экспериментальных исследований свойств гомогенных радиационно-защитных материалов // Труды первой научно-технической конференции молодых ученых Уральского энергетического института. Екатеринбург: ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», 2016. С.254-257.

Работа выполнена в рамках Соглашения №14.579.21.0116 о предоставлении субсидии Минобрнауки России (Уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI57915X0116).